

复杂条件下陕北浅埋煤层采空区的综合探查技术研究

郭 恒

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司,陕西西安 710077)

[摘要] 陕北浅埋煤层在特殊历史时期因煤层自燃治理遭受了大量露天式偷挖滥采,由此形成的采空区面积广、隐蔽性强、勘探难度大,严重影响浅埋煤层的安全开采。为解决上述采空区探查难题,以陕北神府某矿区为研究区,将结合历史卫星影像、倾斜摄影、地球物理的综合探测技术应用于该区域复杂条件下采空区探测中。历史卫星影像资料揭示了P2排土场西南侧等区域存在明显开采痕迹,通过比对倾斜摄影可进一步划分采场及隐蔽采空区的大致分布范围。在此基础上合理布置物探测线,结果显示,P2排土场下含煤地层对应的电性层在局部区域高阻特征明显缺失。其中,高密度电阻率法ERT-3测线0~225 m之间含煤地层电阻率由 $120 \Omega \cdot m$ 下降至 $60 \Omega \cdot m$ 以下,瞬变电磁法TEM-2测线0~80 m含煤地层电阻率由 $160 \Omega \cdot m$ 下降至 $60 \Omega \cdot m$ 左右。最终,结合历史卫星影像、无人机倾斜摄影、高密度电阻率法与瞬变电磁法结果划分了隐伏采空区的分布边界。以上多种方法优势互补,实现了复杂条件下采空区的高精度、高效率、低成本勘探。

[关键词] 采空区 高密度电阻率法 瞬变电磁法 倾斜摄影 历史卫星影像 浅埋煤层 陕北
[中图分类号] P631 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2025)02-0385-10

Guo Heng. Comprehensive exploration technology on shallow buried coal seam goaf in northern Shaanxi under complex conditions[J]. *Geology and Exploration*, 2025,61(2): 0385-0394.

0 引言

浅埋煤层采空区积水量大、水源补给快、位置分布规律性差,严重威胁煤矿安全生产(李文和李健,2014;张立其等,2015)。陕北神府矿区由于1煤、2煤埋深较浅,受小窑采空区的影响更为严重(孙学阳等,2018;刘立仁等,2024)。在特殊历史时期,因浅埋煤层火区治理等原因,神府矿区浅埋煤层在露天开采、治理过程中形成了大量采空区(徐慧等,2020)。这些采空区范围缺少基础资料,大量隐伏于排土场下或采场周边。由于其极易与采场内积水形成水力联系,已成为了现阶段制约神府矿区浅埋煤层安全开采的重要隐蔽致灾因素之一(蒋泽泉和范立民,2014;牟义,2019)。

物探、钻探是浅埋煤层采空区勘查过程中的主要应用手段(马金荣等,1996;李维,2017;王金波

等,2018;刘小平,2022)。其中,地球物理方法勘探尺度大、结果呈剖面或平面,能够揭露勘探区地下采空区物性异常,是采空区勘查中的重要先行手段(李坚,2012;张宁,2017;何玉海,2020;杨华奎,2023)。在这些地球物理方法中,瞬变电磁法、高密度电阻率法可以基于含煤地层电阻率的变化有效识别采空、积水异常,在采空区勘查领域取得了广泛应用(杨镜明,2012;张克聪等,2016;Gao et al., 2018;苏超等,2018;曹丽珠,2020;Chang et al., 2020;徐慧等,2020;孙飞,2022)。但是,区别于常规条件下的采空区勘探问题,陕北神府矿区火区治理形成的采空区地表地形往往受采场割裂严重,或隐伏于排土场下。常规的勘探方法在实施时往往受限于复杂地形、地质条件而成本高、精度低。

在本研究中,针对神府矿区复杂条件下浅埋煤层采空区的勘探难题,将结合历史卫星影像、倾斜

[收稿日期] 2024-03-12;**[改回日期]** 2024-12-25;**[责任编辑]** 陈伟军。

[基金项目] 中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新基金项目(编号:2022XAYJS06)和陕西自然科学基金重点研发计划项目(编号:2022SF-046)联合资助。

[第一作者] 郭 恒(1978年-),男,副研究员,2014年毕业于西安科技大学地球探测与信息技术专业,硕士研究生学历,主要从事煤矿领域地球物理勘探方面的研究工作。E-mail: ghjwpg@163.com。

摄影、高密度电阻率法、瞬变电磁法的综合勘查方法应用于研究区的采空区勘查中,有效降低了探测成本,提高了解释结果精度。

1 研究区概况

1.1 位置与自然地理

研究区东距府谷县城 65 km,西距神木市大柳塔镇 30 km。区域位于陕北黄土高原的北端,西与毛乌素沙漠相邻,属典型的黄土丘陵沟壑风沙地貌,树枝状沟谷十分发育。研究区地势呈北高南低,最高点标高+1418.1 m,最低点海拔高度+1064.2 m。气候属中温带大陆性季风气候带。

1.2 地层、煤层

陕北侏罗纪煤田神府矿区地层属华北地层区(陈陇刚等,2005),鄂尔多斯地层分区,东胜-环县地层小区。研究区内地层由老至新有:三叠系上统延长组(T_{3y}),侏罗系下统富县组(J_{1f}),侏罗系中统延安组(J_{2y})、直罗组(J_{2z})、安定组(J_{2a}),白垩系下统

洛河组(K_1l),新近系(N)及第四系(Q)。

矿区煤系为侏罗系中统延安组(J_{2y}),本次研究调查的重点为 $4^{-2上-1}$ 煤层小窑采空区。其中, $4^{-2上-1}$ 煤层埋藏深度0~137.75 m。煤矿内各大沟谷因遭受剥蚀及火烧,见煤区内平均厚度 1.89 m。

1.3 研究区内浅埋煤层采空区分布特点

研究区内露天采煤活动主要分为两个阶段,第一阶段为2010年以前~2013年,民间小范围开采;第二阶段为2014年~2018年,火区综合治理项目正式开始,此阶段破坏资源量范围较大。由于项目实施过程不受监管,对其剥挖的地表、煤层、储量等情况难以准确掌握,为煤矿未来的安全生产带来隐患。图 1a 为区域露天开采形成的采场分布状况。图 1b、c 显示了研究区内露天开采特征及采坑内的积水。

由于火区综合治理的实施过程不受监管,实际采场的范围缺少基础资料,导致大量排土场下部及采场周边存在隐伏采空区,且与采场积水存在水力联系,严重影响下伏煤层的安全开采。

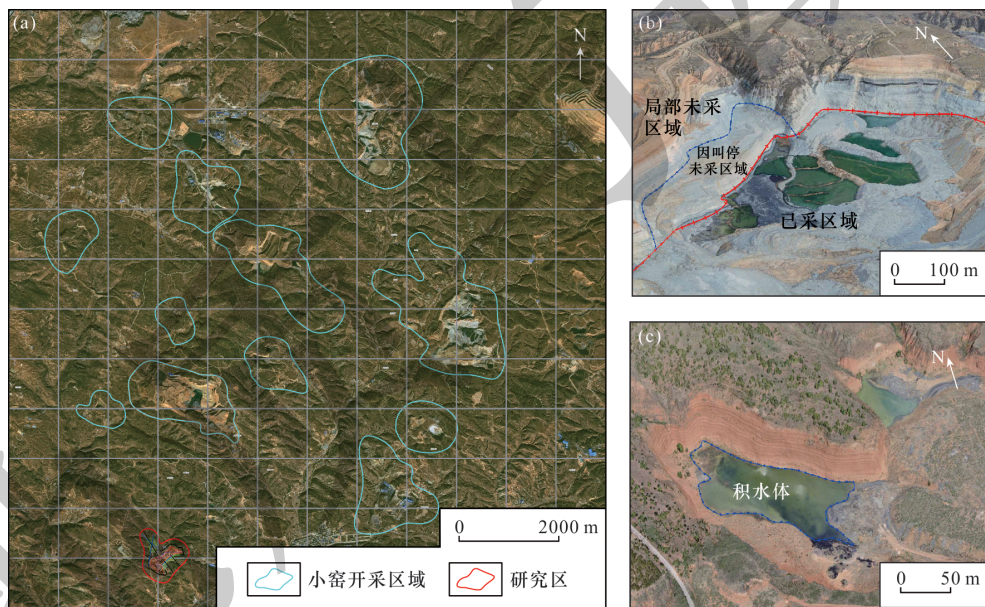


图 1 煤层自然治理形成的采空区分布与特征

Fig. 1 Distribution and characteristics of goaf formed by spontaneous combustion control of coal seam

a-依据卫星影像识别的小窑采点分布;b-倾斜摄影显示的地貌特征;c-倾斜摄影显示的采场积水体

a-distribution of small-scale coal mining points identified based on satellite imagery; b-geomorphic features displayed by oblique photography; c-accumulated water in the mining area displayed by oblique photography

2 综合探测技术

研究区内地形施工条件极为复杂,开展扫面式的物探工作不仅面临施工难度大、工作量多等困难,同时复杂的测区条件也会影响物探方法的探测

效果。为此,本研究使用了联合历史卫星影像、倾斜摄影、高密度电阻率法与瞬变电磁法的综合探测技术,取得了较好的探测效果。

2.1 历史卫星影像资料分析

本文中使用的卫星影像主要来自目前可免费

观看与下载的谷歌地球。研究区内的历史卫星影像资料来自陆地卫星 Landsat-8、NGA、NOAA 搭载的各种传感器,可获取 1985 年~2021 年期间区域内真实、直观的地表地貌特征变化(杜守航等,2023)。

采用目视解译(王家琛等,2017),筛选明显的人为挖掘、填埋区域,勾绘矿区内共计 13 处小窑开采区域(图 1a 内青色与红色线条勾画范围)。对于每处小窑开采区,可结合不同时间节点的历史影像,分析采场范围与排土场范围。图 2 显示了本次研究区域的地貌特征变化过程。结果清晰显示,研究区内小窑开采开始于 2011 年~2014 年期间,在

2014 年~2021 年期间不断扩大规模,在 2021 年之后被紧急叫停。其中,红色线条勾勒区域在 2014 年年 3 月最早出现开挖特征,地貌明显由灰色转为灰白色。同时间段内,采场北侧出现一处排土场(绿色线条),其与采场分离,推断为外部排土场。2014 年~2021 年期间,采场范围不断扩大。采场东南侧绿色线条区域地貌也产生部分变化,但无法确认其下部煤层是否已采空或仅为排土场。

综上,可依据历史卫星影像大致划分采场范围与排土场范围。但很难判断绿色圈定的 P1 与 P2 两处排土场下部煤层是否已被偷采。

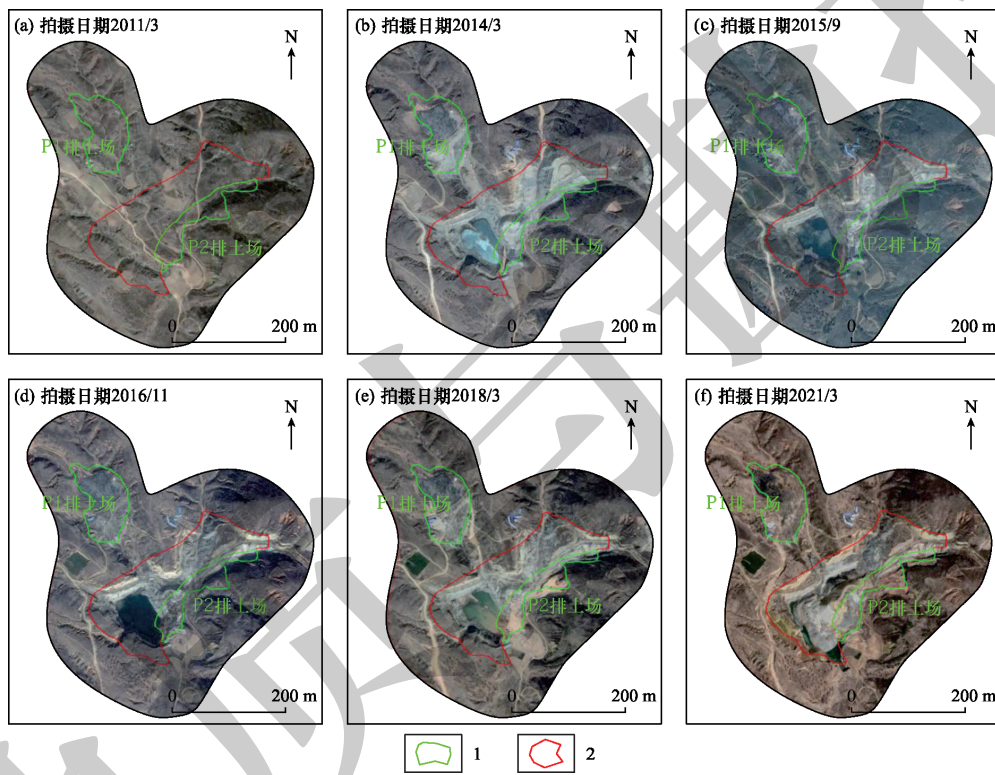


图 2 研究区地貌演化

Fig. 2 Geomorphologic evolution of of the study area

1-历史卫星影像识别排土场区域;2-历史卫星影像识别采场区域;a-拍摄时间 2011 年 3 月;b-拍摄时间 2014 年 3 月;c-拍摄时间 2015 年 9 月; d-拍摄时间 2016 年 11 月;e-拍摄时间 2018 年 3 月;f-拍摄时间 2021 年 3 月

1-waste dump area from historical satellite image recognition; 2-coal mining area from historical satellite image recognition; a-photography taken in March 2011; b-photography taken in March 2014; c-photography taken in September 2015; d-photography taken in November 2016; e-photography taken in March 2018; f-photography taken in March 2021

2.2 倾斜摄影调查

无人机倾斜摄影技术可以通过无人机平台搭载的高精度摄影相机获取地表多角度、高分辨率的航测影像,快速构建研究区真实、直观的实景 3D 影像(侯恩科等,2017;龙林丽等,2021;李斯等,2023)。在研究区极为复杂的地形条件下,快速开

展“虚拟实地调查”以进一步提高采场与排土场边界的划分精度并指导物探测线科学规划。

本次无人机倾斜摄影采用的仪器为深圳市大疆创新科技有限公司研发生产的 M30 专业航拍无人机。摄影过程中搭载了 RTK 模块与高达 4800 万像素的高清摄像头。

通过收集研究区地形资料,将飞行高度设置为200 m,在研究区内公路、小路边设定像控点9个,像控点坐标采用GNSS RTK采集。内业数据处理主要包括,导入照片、空三测量、相控测点、模型重建。最终可得到测区真三维模型,见图3a。

三维模型清晰真实地还原了研究区的地形起伏情况,同时可以快速读取煤层露头、地表高程信息。高密度电法在施工过程中必须沿测线连续布置线缆,其线缆(排列)长度与勘探深度相关。排土场与采场周边地形极为复杂,极大程度限制了测线布置。错误的测线设计极易造成勘探深度无法满足需求,甚至在实际中无法安全施工。三维模型读取的煤层露头高程与排土场、地表高程可用于指导

高密度电法测线长度合理设计。同时,地形起伏信息可用于指导测线沿合理方向优化设计,提高施工作业效率。

本研究内,依据3D模型资料可进一步细化历史卫星影像结果勾画的采场范围与排土场范围。如图1右所示,可通过目视直接判别已开采的采场区域、局部未采区域、积水区域。通过提取坐标细化区域边界。依据3D模型资料确定测线设计如图3a所示,测线的首尾点可以在Smart 3D软件内读取,并经坐标转换算法转换为平面投影坐标,并采用通用绘图软件如AutoCad等绘制测线布置图(详见图3b),进而采用GNSS RTK设备对物探测线进行放样。

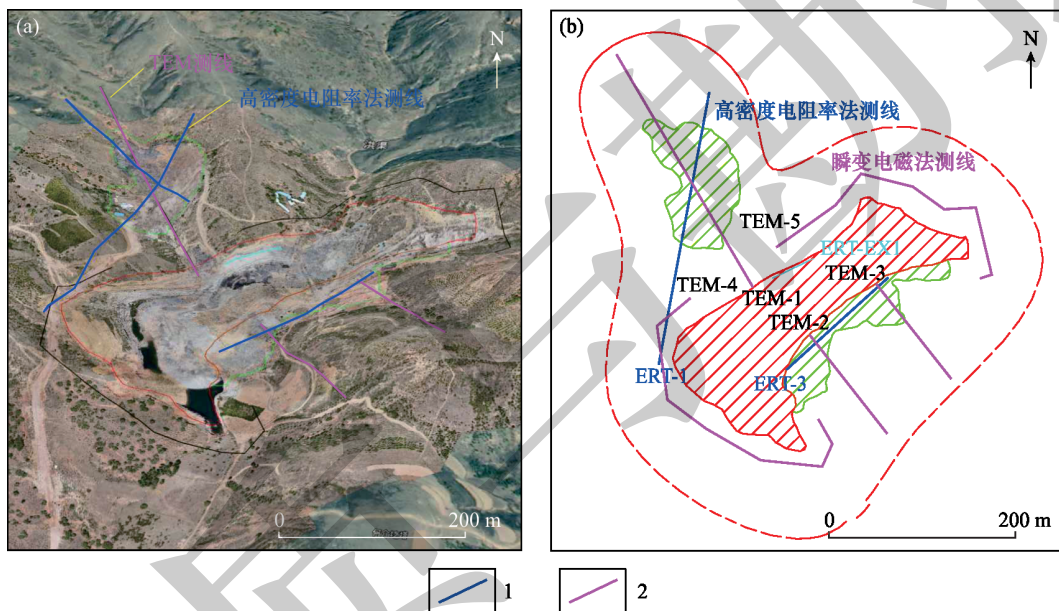


图3 研究区倾斜摄影真三维模型及物探测线规划

Fig. 3 True 3D model of oblique photography and geophysical survey line planning in the study area

1-高密度电阻率法测线;2-瞬变电磁法测线;a-倾斜摄影显示的测区地貌以及据此布置的物探测线;b-物探测线平面示意图

1-measurement line of high-density resistivity method; 2-measurement line of transient electromagnetic method; a-geomorphology of the survey area and the geophysical survey lines displayed by oblique photography; b-plane sketch of geophysical survey lines

2.3 地球物理调查

地球物理调查采用高密度电阻率法与瞬变电磁法。高密度电阻率可以通过在地表沿直线布置一系列电极,实现地下地层电阻率的快速成像。由于其效率高、成本低、抗干扰能力强,在采空区勘查中取得了广泛的应用。瞬变电磁法可以在研究区较差的地形条件下弥补高密度电阻率法的施工条件局限。

2.3.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法探测采用重庆奔腾地质仪器

厂研发生产的WGMD-9型超级高密度电阻率系统。电极距设置为5 m,探测装置使用分辨率较高的温纳-斯伦贝谢装置。数据处理采用Res2dinv软件,反演方案采用平滑约束的最小二乘反演(Loke and Barker, 2012)。

图4显示了高密度电阻率法试验测线的反演结果,结果表明正常地层的电性结构呈层状结构、规律清晰,煤层相比泥砂岩体现为明显的高阻特征,其反演电阻率一般为 $300 \Omega \cdot \text{m}$ 以上。

图5为两条典型高密度电阻率法测线的反演结

果。其中,图 5a 为 ERT-1 测线反演电阻率断面图,图 5b 为 ERT-3 测线反演电阻率断面图。结果显示,研究区地层的电性结构一般主要可分为两层,其中第一层一般位于 1175 m 高程以上,该电性层的电阻率相对较低,一般为 23~50 $\Omega\cdot\text{m}$,通过与现场露头对照,该电性层一般为萨拉乌苏组及保德组红土层等松散层的电性反映。第二层的高程一般低于 1175 m,该电

性层为含煤地层的电性反映,表现为标志性高阻特征,反演电阻率值一般为 120 $\Omega\cdot\text{m}$ 以上。当该电性层规律发生错乱,高阻特征丢失时,则地下原生地层及煤层可能由于偷采已形成采空区。据此,可以推断 P1 排土场下的地层依然为原生地层。而 P2 排土场下可能存在采空区,位置赋存于 ERT-3 测线的 0~225 m 之间。

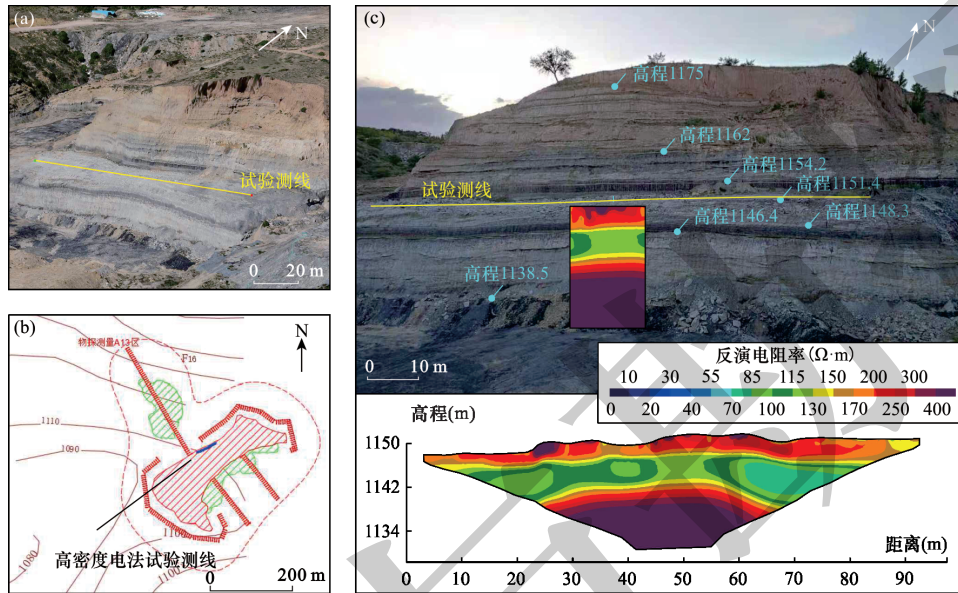


图 4 高密度电阻率法场地试验结果

Fig. 4 Field test results of high-density resistivity method

a-试验测线位置及周边地貌;b-测线位置平面示意图;c-试验测线反演电阻率断面与含煤地层对应关系.

a-test line location and surrounding topography; b-sketch plane of the survey lines; c-correlation between the inversion of resistivity cross-section and coal-bearing strata using experimental survey lines

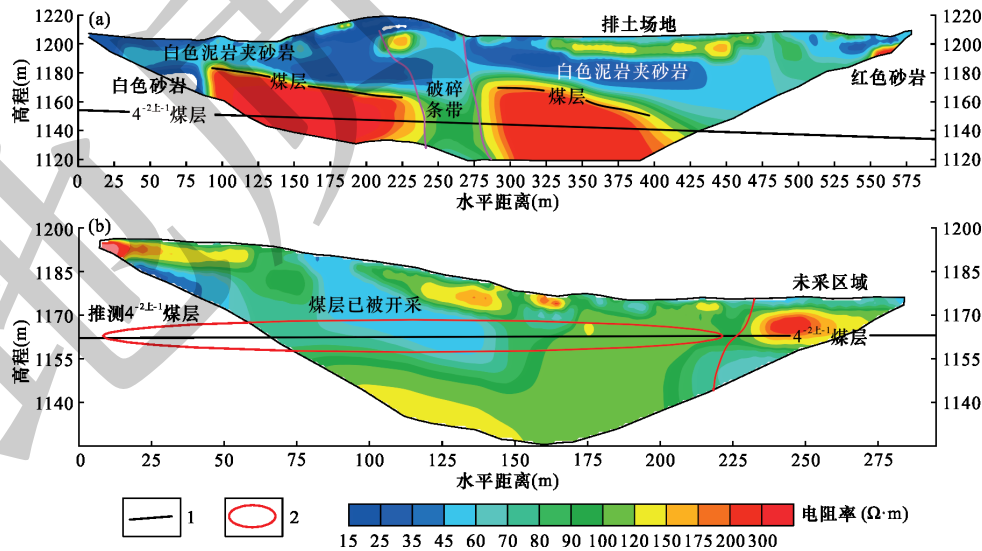


图 5 高密度电阻率法探测结果

Fig. 5 Detection results of the high density resistivity method

a-ERT-1 线反演电阻率断面与解释;b-ERT-3 线反演电阻率断面与解释;1-煤层;2-推测采空区异常

a-inverse resistivity profile and interpretation of ERT-1 line; b-inverse resistivity profile and interpretation of ERT-3 line; 1-coal seam; 2-inferred anomalies in goaf

2.3.2 瞬变电磁法

瞬变电磁法探测采用澳大利亚 Monash GeoScope 公司生产的 Terra TEM 瞬变电磁法系统。采用重叠回线测量,其中,发射线圈采用 20 m×20 m×2 匝,接收线圈面积 800 m²,发射电流 10 A。数据处理及反演采用 Ix1d 软件,反演方法选用奥卡姆反演(张文波等,2022; Scholl et al., 2009)。单点反演结束后,对反演数据加入地形数据,采用 Surfer 软件进行成图。

图6显示了TEM-1与TEM-2两条典型瞬变电磁法反演电阻率断面。与高密度电阻率法反演断面相吻合,断面由上向下一般可分为两个电性层,电阻率特征为上低下高。电性层的分界指示了4^{2L-1}煤的顶板。与高密度电阻率法的解释理论相同,通过判别煤层高阻电性特征的减弱、缺失可判别,P1排土场下部未经过小窑开采。而P2排土场部分区域则可能遭遇偷采,位于TEM-2测线的0~80 m位置。

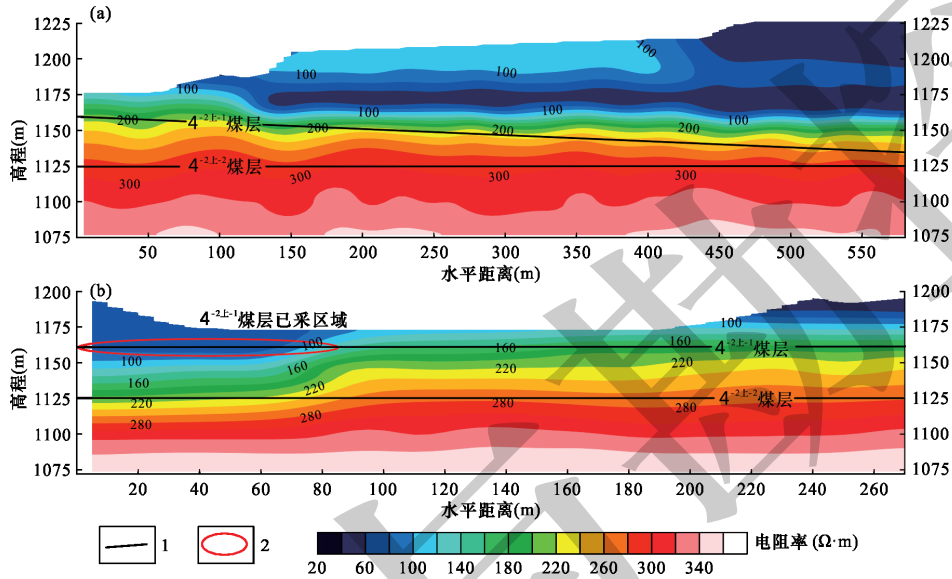


图6 瞬变电磁法反演电阻率断面

Fig. 6 Inverse resistivity profile using transient electromagnetic method

a-TEM-1线反演电阻率断面与解释;b-TEM-2线反演电阻率断面与解释;1-煤层;2-推测采空区异常

a-inverse resistivity profile and interpretation of TEM-1 line; b-inverse resistivity profile and interpretation of TEM-2 line; 1-coal seam; 2-inferred anomalies in goaf

2.4 综合推断解释

在探测区较为分散、地形条件较差的情况下布置扫面式的物探工作面临较大的探测成本与施工难度。将历史卫星影像、倾斜摄影、物探结果相结合,则可以快速、可靠的推断划分采空区边界。

图7为综合探查技术路线图。在实际工作中,可首先依据历史卫星影像结果显示的原生地貌变化特

征识别矿区范围内小窑开采区域(如图1a所示)。然后结合历史卫星影像与倾斜摄影结果划分明显采空区范围(采场范围),并大致确定隐蔽采空区的可能赋存范围。最后,结合倾斜摄影识别的地貌特征与物探结果综合划分隐蔽采空区范围。采场范围与隐蔽采空区范围组成了最终推断的采空区范围。图7给出了综合勘查资料的详细判别标准与流程。

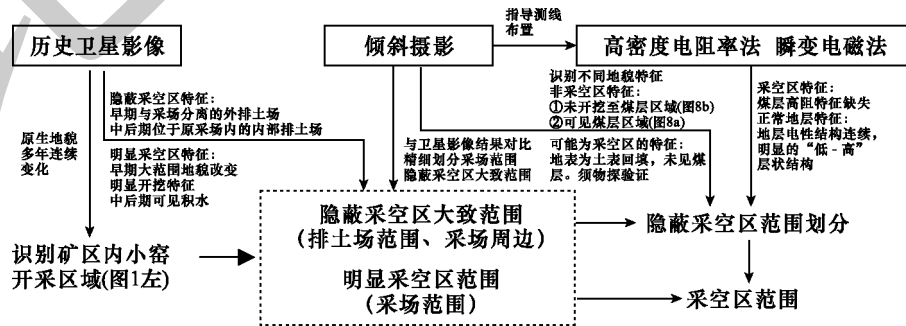


图7 综合探查技术路线图

Fig. 7 Roadmap of comprehensive exploration technology

在本研究区内,物探结果表明,P1排土场下含煤地层对应的电性层(高程 1175 m 以下)高阻反映明显。其中高密度电法反演电阻率一般为 $120 \Omega \cdot m$ 以上,瞬变电磁法反演电阻率为 $200 \Omega \cdot m$ 以上。电性层呈层状分布,顶界由西南倾向东北,与煤层产状一致。据此可推断,物探测线底部为原生地层,未见明显偷采痕迹。航拍结果显示,P1排土场位于山沟内,排土场两侧未见开挖痕迹,排土场两侧原生地层地表高程较高,一般为 1210 m 左右。历史卫星资料显示,P1排土场形成时间与采场早期开采过程一致,均处于 2011 年 3 月~2014 年 3 月期间。其很可能因山谷地形堆积容量优势设计为采场早期开采的外部排土场。综上,可以推断 P1 排土场下为原

生地层,未经历偷采。

物探结果显示,P2排土场下含煤地层对应的电性层在局部区域高阻特征明显缺失。其中,高密度电阻率法 ERT-3 测线 0~225 m 之间含煤地层电阻率由 $120 \Omega \cdot m$ 下降至 $60 \Omega \cdot m$ 以下,瞬变电磁法 TEM-2 测线 0~80 m 含煤地层电阻率由 $160 \Omega \cdot m$ 下降至 $60 \Omega \cdot m$ 左右。据此可推断,物探测线下局部区域煤层已遭偷采。但是,仅依据稀疏的三条物探测线难以精细划分采空区边界。本研究中,通过研究物探揭示采空区边界区域的实景 3D 影像,可以发现部分区域存在原生地层元素(详见图 8a、b)。历史卫星影像资料显示,P2排土场西南侧与采场连接区域存在明显开采痕迹,开采时间为 2013 年 3 月~2016 年

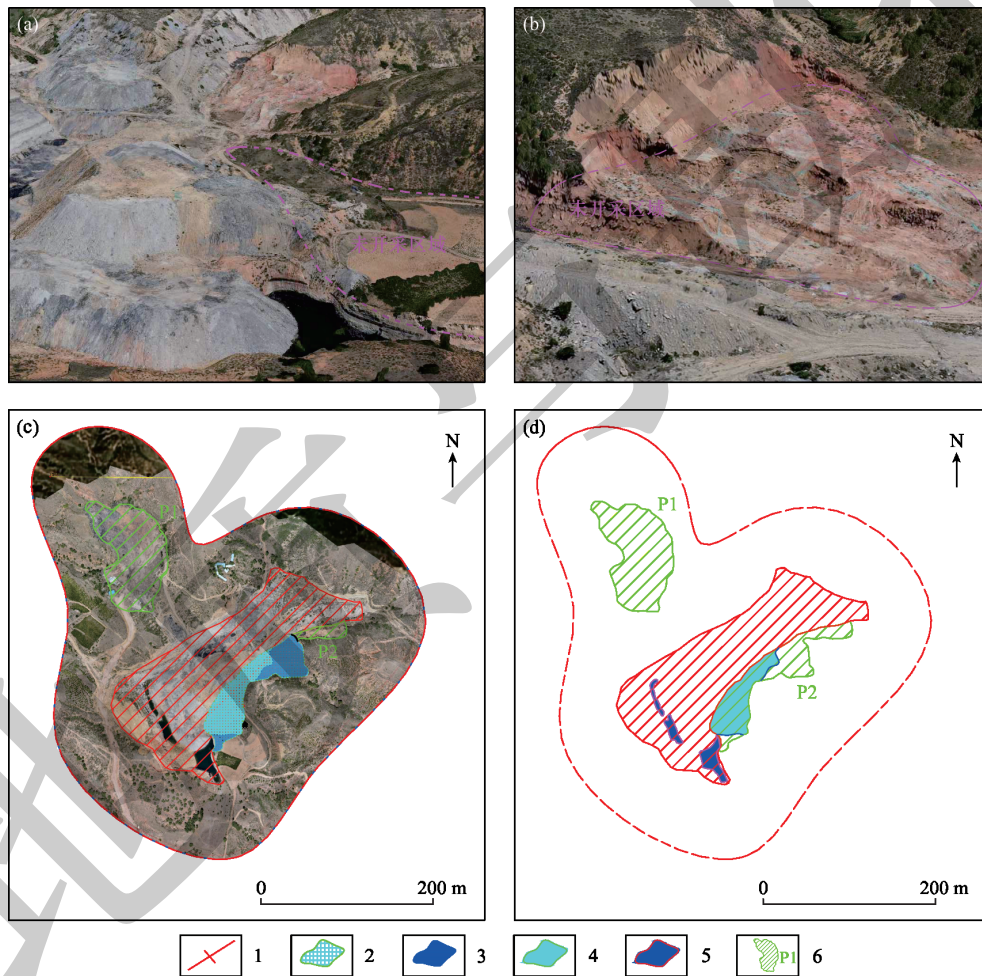


图 8 采空区边界综合推断

Fig. 8 Comprehensive inference of the goaf boundary

1-物探显示的采空区范围;2-历史卫星影像显示的地貌变化区域;3-倾斜摄影显示的未开采地貌特征区域;4-推断采空区范围;5-地表积水区域;6-排土场范围及编号;a,b-依据倾斜摄影可识别出的局部未开采区域;c-未开采区域分布与物探显示的采空区范围;d-最终划分的采空区范围
1-scope of goaf displayed by geophysical exploration; 2-geomorphic change areas displayed in historical satellite imagery; 3-areas of unmined geomorphic features displayed by oblique photography; 4-inferred scope of goaf; 5-surface water accumulation area; 6-scope of waste dump site and number; a, b-locally unexploited areas identified from oblique photography; c-distribution of unmined areas and the range of goaf revealed by geophysical exploration; d-finally delineated goaf area

11月。将物探异常区域、3D影像与历史卫星影像识别的采空区、原生地层边界信息投影至平面图上(见图8c),其中历史卫星影像显示的具有开采痕迹(地貌变化区域,详见图中青色填充区域)可宏观控制采空区边界范围,但是难以识别局部未开采至煤层的区域,如图8a、b所示。本研究中,物探显示的采空区异常范围(图8c中红色线条)与倾斜摄影模型显示的未开采至煤层区域(图8c中蓝色填充区域)可进一步补充细化采空区边界结果,最终划分结果见图8d。其中,红色线条填充为采场区域,青色区域为隐蔽采空区。红色区域与青色区域共同组成了研究区内的小窑采空区范围。相比煤矿产权方企业以往掌握的资料,本次研究给出的采空范围可靠性明显更高,范围更加准确,并间接发现了P1排土场下仍存在煤层储量。

3 结论

在本研究中,将结合历史卫星影像、倾斜摄影、地球物理的综合探测技术应用于复杂条件下浅埋煤层采空区的探查中。结果表明,历史卫星影像资料可快速了解研究区内小窑开采的历史演化过程,快速识别矿区内小窑开采点分布,并初步划分采场范围与排土场范围。

倾斜摄影建立的实景3D模型可提取煤层露头、地表高程等信息,可用于指导高密度电法测线布置,使其排列长度符合勘探深度需求,并提高施工作业效率。通过结合倾斜摄影与历史卫星影像结果,可以进一步细化采场与排土场边界划分精度。

基于高密度电阻率法与瞬变电磁法的地球物理方法可以有效识别测线位置地下的采空区分布情况,在结合实景3D模型后,可以划分更加可靠的采空区边界。三种方法互为补充,为小窑采空区提供更有效的探测方法手段。

[References]

- Chang Jianghao, Su Benyu, Reza M, Xing Xiujun. 2020. Detection of water-filled mining goaf using mining transient electromagnetic method [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 16(5): 2977-2984.
- Chen Longgang, Chen Lei, Chen Lirong, Guan Liumin, Gao Manzhong. 2005. Re-division of coal-bearing strata and coal seams in the Shenfu mining area of the Jurassic coalfield in northern Shaanxi [J]. Geology of Shaanxi, 1(1): 70-78 (in Chinese with English abstract).
- Cao Lizhu. 2020. Application of transient electromagnetic method in detection of coal mine goaf areas [J]. Jiangxi Coal Science and Technology, (4): 115-118 (in Chinese with English abstract).
- Du Shouhang, Li Wei, Xing Jianghe, Zhang Changye, Wang Shaoyu, Li Jun. 2023. Change detection of open-pit mines based on FM-UNet++ and GF-2 satellite images [J]. Coal Geology & Exploration, 51(7): 130-139 (in Chinese with English abstract).
- Gao Weifu, Shi Longqing, Han Jin, Zhai Peihe. 2018. Dynamic monitoring of water in a working face floor using 2D electrical resistivity tomography (ERT) [J]. Mine Water and the Environment, 37(3): 423-430.
- He Yuhai. 2020. Analysis and application of high-density electrical method in the investigation of small coal mine goaf areas [J]. North China Earthquake Science, 38(S1): 63-66 (in Chinese with English abstract).
- Hou Enke, Shou Zhaogui, Xu Youning, Yang Fan, He Fang, Xie Xiaoshen, Gao Guanjie. 2017. Application of UAV remote sensing technology in monitoring of coal mining-induced subsidence [J]. Coal Geology & Exploration, 45(6): 102-110 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zequan, Fan Limin. 2014. Evaluation of up-goaf water inrush possibility in Shenfu mining area [J]. China Mining Magazine, 23(9): 102-106 (in Chinese with English abstract).
- Li Jian. 2012. Application of geophysical exploration technology in small coal mine goaf areas for railway engineering geological survey [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 36(S1): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- Li Si, Yang Zi'an, Li Dongyue, Zhang Jianguo, Lu Jia, Yin Zhan. 2023. Geological environment investigation and evaluation of the Chimashan copper deposit based on 3D modeling technology of UAV tilt photography [J]. Geology and Exploration, 59(6): 1271-1281 (in Chinese with English abstract).
- Li Wei. 2017. Comprehensive investigation and foundation stability evaluation of small coal mine goaf [J]. Shanxi Architecture, 43(8): 56-58 (in Chinese with English abstract).
- Li Wen, Li Jian. 2014. Analysis and control technology of hazards in shallow-buried coal seam room and pillar goaf [J]. Coal Mine Safety, 45(1): 64-66 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liren, Xu Hui, Lv Mingjie, Li Jie, Chen Kai, Mou Yi. 2024. Fine comprehensive exploration technology for goafs in Shenfu mining area [J]. Coal Engineering, 56(4): 28-35 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoping. 2022. Technological progress in the investigation of goaf in underground coal mines beneath building structures in China [J]. Coal Geology & Exploration, 52(4): 139-146 (in Chinese with English abstract).
- Long Linli, Liu Ying, Zhang Xuyang, Su Yongdong, Chen Xiaoyang. 2021. Application of unmanned aerial vehicle in surface soil characterization and geological disaster monitoring in mining areas [J]. Coal Geology & Exploration, 49(6): 200-211 (in Chinese with English abstract).
- Ma Jinrong, Pen Xiangfeng, Ding Chenjian. 1996. Engineering geological research methods for the suitability of building construction in coal mine goaf areas [J]. Coal Geology & Exploration, (6): 46-48 (in Chinese with English abstract).

- Loke M H, Barker R D. 2012. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections [J]. *Geophysics*, 60(6):1682-1690.
- Mu Yi. 2020. Analysis of disaster-causing factors and exploration techniques in concealed mined areas in Shenfu mining area [J]. *Progress in Geophysics*, 35 (3) : 1017-1024 (in Chinese with English abstract).
- Scholl C, Helwig S, Tezkan B, Mark G, Uri K. 2009. 1-D multimodel joint inversion of TEM-data over multidimensional structures [J]. *Geophysical Journal International*, 176(1): 81-94.
- Su Chao, Guo Heng, Hou Yanwei, Ma Bingzhen. 2018. Static correction of CSAMT and its application in the detection of coal mine goaf areas [J]. *Coal Geology & Exploration*, 46(4) : 168-173 (in Chinese with English abstract).
- Sun Fei. 2022. Application of high-density electrical method in geological exploration of coal mine goaf areas [J]. *Geotechnical Engineering Techniques*, 36 (5) : 385-388 (in Chinese with English abstract).
- Sun Xueyang, Liu Ziqiang, Li Cheng, Miao Lintian. 2018. Research progress on water-preserving mining in Yushenfu mining area [J]. *Safety in Coal Mines*, 49 (7) : 66-70 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinbo, Qin Xiube, Li Shoulei, Zhang Fuxing. 2018. Study of the roof falling regularities in hidden goafs based on drilling detection [J]. *Gold*, 39(1):34-39 (in Chinese with English abstract).
- Xu Hui, Mou Yi, Yang Sitong, You Chao, Sun Qingxian, Zhang Xiaobo. 2020. Integrated electrical exploration technology for shallow coal mine goaf areas in Yulin area [J]. *Geology and Exploration*, 56(4) : 792-801 (in Chinese with English abstract).
- Yang Huakui. 2023. Hydrogeological exploration technology for the Longdong coal mine goaf based on the transient electromagnetic method [J]. *Geology and Exploration*, 59 (4) : 883-890 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingming. 2012. Investigation effectiveness of high-density resistivity method in coalfield goaf areas [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 36 (S1) : 12-15 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kecong, Zhang Yongchao, Li Hongjie, Li Dishuan. 2016. Application research on high-resolution CSAMT for detecting shallow coal mine goaf areas [J]. *China Coal*, 42(7) : 24-28, 34 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liqi, Liu Yang, Fang Gang. 2015. Research on safe mining technology in water-filled goaf of shallow-buried coal seam in northern Shaanxi [J]. *Coal Geology & Exploration*, 43 (6) : 60-64 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ning. 2017. Application research of comprehensive surveying techniques in small coal mine goaf areas [J]. *Railway Investigation*, 43(4) : 55-57 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenbo, Zhang Ying, Li Jianhui. 2022. Ground-loop transient electromagnetic one-dimensional inversion system and its application [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 46 (5) : 1258-1266 (in Chinese with English abstract).
- [附中文参考文献]
- 陈陇刚, 陈磊, 陈丽荣, 管六民, 高满忠. 2005. 陕北侏罗纪煤田神府矿区含煤地层及煤层的重新厘定划分 [J]. *陕西地质*, 1(1): 70-78.
- 曹丽珠. 2020. 瞬变电磁法在煤矿采空区探测中的应用 [J]. *江西煤炭科技*, (4): 115-118.
- 杜守航, 李炜, 邢江河, 张成业, 余长超, 王绍宇, 李军. 2023. 基于FM-UNet++和高分二号卫星影像的露天矿区范围变化检测 [J]. *煤田地质与勘探*, 51(7):130-139.
- 侯恩科, 首召贵, 徐友宁, 杨帆, 何芳, 谢晓深, 高冠杰. 2017. 无人机遥感技术在采煤地面塌陷监测中的应用 [J]. *煤田地质与勘探*, 45(6): 102-110.
- 何玉海. 2020. 高密度电法在小煤窑采空区勘察中的分析应用 [J]. *华北地震科学*, 38(S1): 63-66.
- 蒋泽泉, 范立民. 2014. 神府矿区上覆采空区积水突水危险性分析 [J]. *中国矿业*, 23(9): 102-106.
- 李文, 李健. 2014. 浅埋煤层房采采空区隐患分析与治理技术 [J]. *煤矿安全*, 45(1): 64-66.
- 李维. 2017. 小煤窑采空区综合勘察与地基稳定性评价 [J]. *山西建筑*, 43(8): 56-58.
- 李坚. 2012. 小煤窑采空区物探技术在铁路工程地质勘察中的应用 [J]. *物探与化探*, 36(S1): 1-6.
- 李斯, 杨自安, 李冬月, 张建国, 鲁佳, 尹展. 2023. 基于无人机倾斜摄影三维建模技术的赤马山铜矿地质环境调查及评价 [J]. *地质与勘探*, 59(6):1271-1281.
- 龙林丽, 刘英, 张旭阳, 苏永东, 陈孝杨. 2021. 无人机在矿区表土特征及地质灾害监测中的应用 [J]. *煤田地质与勘探*, 49(6): 200-211.
- 刘立仁, 徐慧, 吕明杰, 李杰, 陈凯, 牟义. 2024. 神府矿区采空区精细化综合勘探技术研究 [J]. *煤炭工程*, 56(4):28-35.
- 刘小平. 2022. 我国建(构)筑物场地下伏煤矿采空区勘察技术进展 [J]. *煤田地质与勘探*, 52(4): 139-146.
- 马金荣, 彭向峰, 丁陈建. 1996. 煤矿采空区场地建筑适宜性工程地质研究方法 [J]. *煤田地质与勘探*, (6): 46-48.
- 牟义. 2020. 神府矿区隐蔽采空区相关致灾因素分析及勘查技术 [J]. *地球物理学进展*, 35(3):1017-1024.
- 孙飞. 2022. 高密度电法在煤矿采空区地质勘探中的应用 [J]. *岩土工程技术*, 36(5): 385-388.
- 孙学阳, 刘自强, 李成, 苗霖田. 2018. 榆神府矿区保水采煤技术研究进展 [J]. *煤矿安全*, 49(7):66-70.
- 苏超, 郭恒, 侯彦威, 马炳镇. 2018. CSAMT静态校正及其在煤矿采空区探测的应用 [J]. *煤田地质与勘探*, 46(4): 168-173.
- 王家琛, 李明, 王学海, 吴万铎, 张铁英, 侯培锋. 2017. 基于卫星影像解析的碳酸盐岩地区地质构造研究——以江苏徐州大北望地区为例 [J]. *地质与勘探*, 53(2):318-324.
- 王金波, 秦秀合, 李寿磊, 张富兴, 石超. 2018. 基于钻孔法探测的隐伏采空区冒落规律研究 [J]. *黄金*, 39(1):34-39.
- 徐慧, 牟义, 杨思通, 游超, 孙庆先, 张小波. 2020. 榆林地区浅埋煤层采空区电法综合勘探技术 [J]. *地质与勘探*, 56(4): 792-801.
- 杨华奎. 2023. 基于瞬变电磁法的陇东煤矿采空区水文地质勘探技术研究 [J]. *地质与勘探*, 59(4):883-890.

- 杨镜明. 2012. 高密度电阻率法煤田采空区勘察效果[J]. 物探与化探, 36(S1): 12-15.
- 张克聪, 张永超, 李宏杰, 李帝铨. 2016. 高分辨率 CSAMT 探测浅埋煤层采空区应用研究[J]. 中国煤炭, 42(7): 24-28, 34.
- 张立其, 刘洋, 方刚. 2015. 陕北浅埋煤层采空区积水下安全开采技术研究[J]. 煤田地质与勘探, 43(6): 60-64.
- 张宁. 2017. 综合勘察技术在小煤窑采空区的应用研究[J]. 铁道勘察, 43(4): 55-57.
- 张文波, 张莹, 李建慧. 2022. 地面回线源瞬变电磁法一维反演系统及其应用[J]. 物探与化探, 46(5): 1258-1266.

Comprehensive Exploration Technology on Shallow Buried Coal Seam Goaf in Northern Shaanxi Under Complex Conditions

GUO Heng

(China Coal Technology & Engineering Group Xi'an Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710077)

Abstract: During a special historical period, shallow coal seams in northern Shaanxi suffered from a large number of illegal open-pit mining and overexploitation due to spontaneous combustion control, resulting in a wide area of goaf, strong concealment, and difficult exploration, which has seriously affected the safe mining of shallow coal seams. To solve the above-mentioned problems, a comprehensive exploration technology combining historical satellite images, oblique photography, and geophysics was applied to the goaf exploration in a Shenfu mine of northern Shaanxi under complex conditions. The historical satellite image data reveals obvious mining traces in the southwest side of P2 waste dump and other areas. By comparing oblique photography, the approximate distribution range of the mining site and hidden goaf can be further divided. On this basis, a reasonable arrangement of geophysical survey lines was made, and the results showed that the electrical layer corresponding to the coal-bearing strata under the P2 waste dump was significantly lacking in high resistance characteristics in local areas. Among them, the resistivity of coal-bearing strata between the high-density resistivity method ERT-3 measuring line (0~225 m) decreased from $120 \Omega \cdot \text{m}$ to below $60 \Omega \cdot \text{m}$, and the resistivity of coal-bearing strata between the transient electromagnetic method TEM-2 measuring line (0~80 m) decreased from $160 \Omega \cdot \text{m}$ to around $60 \Omega \cdot \text{m}$. Finally, the distribution boundaries of concealed goaf were determined by combining historical satellite imagery, drone oblique photography, high-density resistivity method, and transient electromagnetic method results. The advantages of the above multiple methods complement each other, which can achieve high-precision, high-efficiency, and low-cost exploration of goaf under complex conditions.

Key words: goaf, high-density resistivity method, transient electromagnetic method, oblique photography, historical satellite imagery, shallow buried coal seam, northern Shaanxi